



# Méthode de Calcul Rapide des Pertes par Courants de Foucault dans les Aimants Permanents

Raouf Benlamine, Frédéric Dubas, Sid-Ali Randi, Dominique Lhotellier,  
Christophe Espanet

## ► To cite this version:

Raouf Benlamine, Frédéric Dubas, Sid-Ali Randi, Dominique Lhotellier, Christophe Espanet. Méthode de Calcul Rapide des Pertes par Courants de Foucault dans les Aimants Permanents. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065266

**HAL Id: hal-01065266**

**<https://hal.science/hal-01065266>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Méthode de Calcul Rapide des Pertes par Courants de Foucault dans les Aimants Permanents

R. Benlamine<sup>1,2</sup>, F. Dubas<sup>2</sup>, S-A. Randi<sup>1</sup>, D. Lhotellier<sup>1</sup> et C. Espanet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Renault SAS

<sup>2</sup> Institut Femto-st, Université de Franche-Comté

**RESUME** – Ce papier propose une méthode de calcul rapide des pertes par courants de Foucault (CF) dans les aimants permanents (APs). Le modèle est basé sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant les éléments finis 3D, puis sur le calcul des courants de Foucault en utilisant les différences finies (DF) avec un maillage grossier. La conductivité électrique dans les APs a été négligée. La machine étudiée est de type synchrone à AP à flux axial (MSAPFA). Le temps de calcul, comparé à un calcul complet par éléments finis 3D (EF-3D), est divisé par 11.

**MOTS-CLES** – Aimants permanents, pertes, courant de Foucault, différences finies, flux axial

## 1. Introduction

Les machines synchrones à APs (MSAP) sont devenues un choix quasiment incontournable dans le domaine automobile, et cela pour leurs hautes performances en couple et puissance massiques. Néanmoins, les APs, notamment à base de terres rares NeFeB ou Sm-Co, restent sensibles à la température, ce qui peut causer leur désaimantation. L'échauffement des APs est dû aux pertes par CF locales causées par la variation spatio-temporelle de l'induction. Ainsi, un axe important de recherche dans le domaine des MSAPs pour des applications de traction automobile est l'estimation des pertes par CF dans les APs afin d'optimiser le dimensionnement de la machine pour maximiser son rendement, et également estimer les échauffements des APs.

Les MSAPs à nombre d'encoches par pôle fractionnaire et à bobinage dentaire sont très présentes dans les applications de traction automobile et cela pour de nombreux avantages en termes de procédés, coûts de fabrication et performances en couple sur une large plage de vitesse. Néanmoins, ce type de topologies présente une force magnétomotrice (FMM) riche en harmoniques spatiales, ce qui induit à l'augmentation des pertes dans les APs [1]. Différents travaux de modélisation et d'estimation de ces pertes peuvent être rencontrés dans la littérature. Dans [2]-[7], les auteurs proposent un modèle analytique 2D basé sur la résolution analytique en considérant la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs [2]-[4] (i.e., résolution de l'équation de diffusion dans les APs) ou à résistance limitée [5]-[7] pour des machines synchrones à aimants montés en surface. Dans [8], les auteurs proposent un modèle basé sur la résolution de l'équation de diffusion, en utilisant la méthode des sous-domaines, pour des machines synchrones à aimants insérés. D'autres modèles simplifiés ont été développés [9]-[12]. Ils sont basés sur le calcul du flux créé par la variation de l'induction dans les APs, en supposant que les CF se développent dans des spires appartenant au volume de l'AP.

Dans ce papier, la machine utilisée sera d'abord décrite. Ensuite, le modèle de calcul des pertes par CF dans les APs sera présenté. Ce modèle tient compte de l'aspect 3D des pertes par CF. Les résultats obtenus et le temps de calcul seront comparés à ceux de la simulation EF-3D. L'objectif de ce travail est de développer une méthode générique pour le calcul des pertes par CF en tenant compte de l'aspect 3D. Ainsi, les pertes pourront être calculées pour des MSAPs à flux radial ou axial, à APs déposés en surface, insérés ou enterrés dans le fer rotorique. Dans cette étude, les APs n'ont pas été segmentés, mais la méthode peut être appliquée à des machines avec des APs segmentés. Dans ce cas, le gain en temps de calcul sera plus important. L'induction dans les APs a été calculée avec EF-3D en négligeant la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs (i.e., à résistance limitée), mais peut être calculée avec un modèle (semi-) analytique à partir de la méthode des sous-domaines ou de circuit équivalent magnétique (i.e., réseau de réductances) afin de réduire notablement le temps de calcul. L'induction magnétique dans les APs constitue l'entrée de notre modèle.

## 2. Description de la machine étudiée

La machine étudiée est de type synchrone à APs à flux axial à double stators extérieurs et rotor intérieur. Le nombre d'encoches dans chaque stator est de 24 et le nombre de pôles au rotor est de 16. Le bobinage de cette machine est de type concentrique. Le motif élémentaire de la machine est représenté à la Figure 1. Le stator est constitué d'empilement de tôles ferromagnétiques, alors que le rotor est en matériau amagnétique. Le flux traverse axialement les APs pour passer d'un stator à un autre. Le rotor ne sert que de support mécanique pour les APs. Cette machine a été simulée avec le logiciel Flux 3D [13].

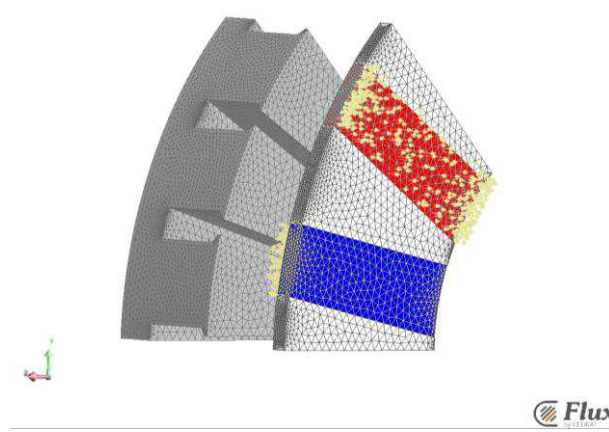


Figure 1 : Machine synchrone à flux-axial à APs montés en surface

## 3. Modèle de pertes par CF dans les APs

Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- Conductivité électrique dans les APs négligée ;
- Prise en compte que de la composante de l'induction dans la direction de l'aimantation (selon l'axe  $z$ ).

La donnée d'entrée de notre modèle est l'induction dans les points de l'AP qui formeront la grille pour le calcul par DF. L'induction est calculée numériquement avec EF-3D en négligeant la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs (i.e., à résistance limitée), ce qui permet de limiter le temps de calcul par EF, mais suppose en contrepartie que la fréquence de variation de l'induction soit limitée (pas d'effet de peau dans les APs).

Les pertes par CF dans les APs sont données par l'équation suivante :

$$P_{pm} = \iiint \rho_{pm} \cdot J^2 \cdot dV \quad (1)$$

Le calcul de la densité de courant se fait à partir de l'équation suivante :

$$\vec{J} = \sigma_{pm} \cdot \vec{E} \quad (2)$$

En utilisant les deux équations suivantes :

$$\overrightarrow{rot}(\vec{E}) = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$div(\vec{E}) = 0 \quad (4)$$

et en négligeant  $B_x$  &  $B_y$  de l'induction dans les APs,  $E_x$  &  $E_y$  du champ électrique dans les APs peuvent être exprimées comme suit :

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} = - \frac{\partial^2 B_z(x, y, t)}{\partial x \partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} = - \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} \quad (6)$$

La résolution de (5) aux dérivées partielles se fera en utilisant les différences finies. Pour cela, une grille 3D est constituée dans les APs.

## 4. Résultats du modèle et comparaison avec EF-3D

Dans l'exemple présenté ici, les pertes ont été calculées pour un courant de 240 Arms et une vitesse de 1000 rpm. Des capteurs d'inductions ont été créés dans les APs, selon une grille 3D en négligeant la conductivité électrique dans les APs. Le temps de calcul pour une période électrique est de 1 heures. Les pertes moyennes par CF dans les APs sont alors de 186 W.

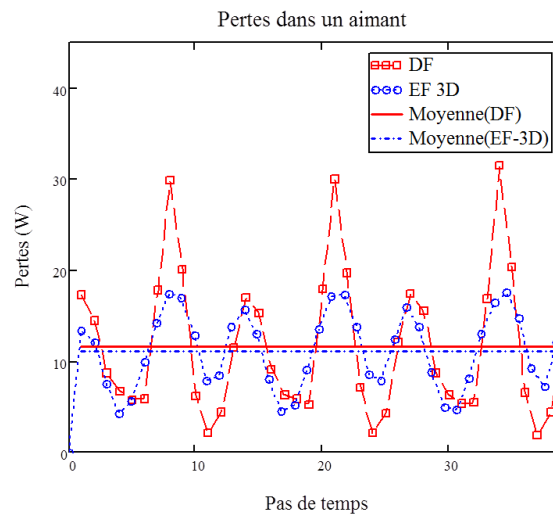


Figure 2 : Comparaison des pertes par CF dans un AP calculés avec le modèle proposé et EF-3D

Afin de valider les résultats obtenus avec le modèle basé sur les DFs, une simulation EF-3D en considérant la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs a été effectuée. Le temps de calcul est de 11 heures. Les pertes par CF moyennes dans les APs sont de 179 W. Ainsi, avec la méthode de calcul des pertes par CF dans les APs proposée, la différence avec les EF-3D avec prise en compte de la conductivité est de 5% et le temps de calcul est divisé par 11. Les pics observés à la Figure 2 sont dus aux dérivées numériques effectuées lors de la résolution avec les DFs. Un moyen de réduire ces pics serait d'augmenter le nombre de points de la grille 3D utilisée pour le calcul par DF, mais cela se ferait au détriment du temps de calcul.

## 5. Conclusion

La méthode de calcul des pertes par CF dans les APs proposée repose sur la résolution des équations de Maxwell en tenant compte de l'aspect 3D de la machine, et cela en utilisant les DFs. L'induction magnétique dans les APs, qui constitue l'entrée du modèle, a été calculée avec un modèle numérique EF-3D en négligeant la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs (i.e., à résistance limitée). Le temps de calcul par rapport à un calcul EF-3D avec prise en compte de la conductivité électrique a été divisé par 11 pour une erreur de 5%. La méthode peut être appliquée à des APs segmentés. Dans ce cas, le gain en temps de calcul sera plus important. En effet, la segmentation des APs implique l'augmentation de capteurs de pertes pour une simulation EF-3D avec prise en compte de la réaction d'induit du champ magnétique sur les APs. Le temps d'évaluation de tous les capteurs augmente également. Par contre, l'induction est déjà calculée dans tous les points du maillage et ne nécessite pas un temps d'évaluation supplémentaire. Par conséquent, la segmentation des APs n'a pas d'impact sur le temps de calcul pour une simulation EF-3D à résistance limitée, si le nombre de nœuds du maillage est conservé. Le temps de calcul sera amélioré en utilisant un modèle (semi-)analytique pour le calcul de l'induction dans les APs qui constitue l'entrée du modèle de calcul des pertes dans les APs.

## 6. Références

- [1] N.Bianchi, E. Fornasiero, « Impact of MMF Space Harmonic on Rotor Losses in Fractional-Slot Permanent-Magnet Machines », *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.24, no. 2, Jun. 2009.
- [2] F. Deng, « Commutation-Caused Eddy-Current Losses in Permanent-Magnet Brushless DC Motors », *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.33, no. 5, Sept. 1997.
- [3] Z. Q. Zhu, K. N. Schofield, D. Howe, « Improved Analytical Modeling of Rotor Eddy-Current Loss in Brushless Machines Equipped with Surface-Mounted Permanent Magnets », *Proc. Instr. Elect. Eng. Elect. Power Appl.*, vol. 151, no. 6, pp. 641-650, 2004.

- [4] F. Dubas, C. Espanet, A. Miraoui, « Field Diffusion Equation in High-Speed Surface Mounted Permanent Magnet Motors, Parasitic Eddy-Current Losses », in *Proc. ELECTROMOTION*, Sep. 2005.
- [5] D. Ishak, Z. Q. Zhu, D. Howe, « Eddy-Current Loss in the Rotor Magnets of Permanent-Magnet Brushless Machines Havin a Fractional Number of Slots Per Pole », *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.41, no. 9, Sept. 2005.
- [6] J. Wang, K. Atallah, R. Chin, W. M. Arshad, H. Lendenmann, « Rotor Eddy-Current Loss in Permanent-Magnet Brushless AC Machines », *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.46, no. 7, Jul. 2010.
- [7] F. Dubas, C. Espanet, « Semi-analytical Solution of 2-D rotor Eddy-Current Losses due to the Slotting Effect in SMPMM », in *Proc. COMPUMAG*, Nov. 2009.
- [8] F. Dubas, A. Rahideh, « 2-D Analytical PM Eddy-Current Loss Calculations in Slotless PMSM Equipped with Surface-Inset Magnets », *IEEE Trans. on Magnetics*, DOI : 10.1109/TMAG.2013.2285525.
- [9] W-Y. Huang, A. Bettayeb, R. Kaczmarek, J-C.Vannier, « Optimization of Magnet Segmentation for Reduction of Eddy-Current Losses in Permanent Magnet Synchronous Machine », *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.25, no. 2, Jun. 2010.
- [10] P. Zhang, G. Y. Sizov, Jiangbiao He, D. M. Ionel and N. Dernerdash, « Calculation of Magnet Losses In Concentrated-Winding Permanent Magnet Synchronous Machines Using a Computationally Efficient - Finite Element Method », *IEEE, Proc. Energ. Conv. Cong. Expos. ECCE*, Sept. 2012.
- [11] A. Tariq, C. E. Nino-Baron, E. G. Strangas, « Iron and Magnet Losses and Torque Calculation of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Magnetic Equivalent Circuit », *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.46, no. 12, Dec. 2010.
- [12] B. Aslan, E. Semail, J. Legranger, «Analytical Model of Magnet Eddy-Current Volume Losses in Multi-phase PM Machines with Concentrated Winding», *IEEE, Proc. Energ. Conv. Cong. Expos. ECCE*, Sept. 2012.
- [13] [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com)